

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G01V 3/28



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 00109775.X

[45] 授权公告日 2005 年 1 月 19 日

[11] 授权公告号 CN 1185508C

[22] 申请日 2000.7.7 [21] 申请号 00109775.X

[71] 专利权人 石油大学(北京)

地址 100022 北京市昌平区水库路

[72] 发明人 陶 果 刘国强

审查员 向 华

[74] 专利代理机构 北京市中实友知识产权代理有限公司

代理人 刘天语

权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 1 页

[54] 发明名称 无趋肤效应电磁波测井方法

[57] 摘要

本发明涉及石油勘探中测量井周不同深度的电导率(电阻率)、介电常数的方法,特点是用 Lambert W 函数求解其电磁场传播系数,进而提取地层电导率。当包含 MAX_T 个发射线圈, MAX_R 个接收线圈时,用如下公式计算出地层视电导率,所得地层电导率信号不存在趋肤效应影响,测量结果准确,在发射频率较高时,可同时获得准确地层介电常数,可以把实现这种方法的电子线路装入井下,直接输出。

$$\sigma_{\text{视}} = -\frac{\text{Im}\left[W\left(\frac{V_m \omega_m \mu_m^2 i}{2K_m e}\right) + 1\right]}{\omega_m \mu_m^2}, \quad \epsilon_{\text{视}} = -\frac{\text{Re}\left[W\left(\frac{V_m \omega_m \mu_m^2 i}{2K_m e}\right) + 1\right]}{\omega_m \mu_m^2}$$

ISSN 1008-4274

无趋肤效应电磁波测井方法

所属技术领域

本发明涉及一种石油勘探领域中测量井周地层不同深度处的电导率（电阻率）、介电常数的无趋肤效应电磁波测井方法。

背景技术

石油勘探中现有的测量井周地层电导率的感应测井方法，按所测量提取的信号方式来分类，主要有以下两种：即测量 R 信号和同时测量 R 信号和 X 信号的感应测井方法。

前者将包含地层重要信息的 X 信号看成无用信号，采用硬件聚焦的方式压制 X 信号，然后据 R 信号来确定地层的电导率。当地层的电导率较大时，受趋肤效应的严重影响，将使地层电导率的测量值低于地层的真电导率，导致仪器响应具有很大误差。

后者同时测量 R 信号和 X 信号，利用 X 信号中包含大量的趋肤效应信息的性质，采用相量反褶积的方法对 X 信号的形状和幅度进行变换，进而校正实部信号中由于趋肤效应的影响而产生的误差。这样，在一定程度上改进了测量精度，但缺陷是：1. 从 R 信号和 X 信号与地层电导率的近似关系出发，由于测量电导率与地层电导率成非线性关系必然导致地层电导率测量精度的下降；2. 为弥补上述缺陷而采用的信号处理校正方法的合理性不能在物理机制上给出令人信服的解释；3. 信号处理过程既要兼顾趋肤效应的校正和保证纵向分辨率不减小又要有益于实时处理，必须采用折衷方案，导致处理过程繁琐，带有人为的因素，其效果的好坏在很大程度上依赖于后验。

测量 R 信号方法的常规感应测井方法对单发单收仪器所得地层视电导率为:

$$\sigma_R = \frac{\operatorname{Re}(V)}{K} = \frac{2}{L^2 \omega \mu} \{[(1+P) \sin P - P \cos P] + i[(1+P) \cos P + P \sin P]\} e^{-P}$$

L 是发射线圈和接收线圈之间的距离;

N_T 和 N_R 分别为发射线圈和接收线圈的匝数;

a_T 和 a_R 分别为发射线圈和接收线圈的半径;

发射线圈的发射电流为 I;

角频率为 ω ; 地层电导率为 σ ; 磁导率为 μ

当线圈缩成点状时, 发射线圈在接收线圈处的感应电动势 V;

$$K \text{ 为仪器常数: } K = \frac{\omega^2 \mu^2 \pi^2 a_T^2 a_R^2 N_T N_R I}{4L}$$

P 为传播系数: $P = L^2 \omega \mu \sigma / 2$;

Re 表示取实部。

由于上面的式子是在 $\omega \sigma \ll \varepsilon$ (σ 为电导率, ε 为介电常数) 的假设条件下得到的。而且, 视电导率只有当小于 $0.01 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 时才接近于真电导率, 在 σ 较大时, 受趋肤效应的严重影响, 将使地层电导率的测量值低于地层的真电导率, 从而降低仪器测量精度。如果此条件不成立, 则 P 值将改变, 这时, σ_a 将包含岩石电导率 σ 与介电常数 ε 的信息。这样导致所测视电导率与地层的真电导率相差更远。

同时测量 R 信号和 X 信号的相量双感应测井方法所得地层视电导率为:

$$\sigma_p(j) = \sum_{l=1}^N h(j-l) \sigma_R(l) + A(\sigma_x) \sum_{l=1}^N b_o(j-l) \sigma_x(l)$$

其中: $\sigma_R = \frac{\text{Re}(V)}{K}$; $\sigma_X = \frac{\text{Im}(v - V_0)}{K}$, Re、Im 分别表示取实部、虚部, V_0 为直耦信号。式中, δ_p 是校正后的测量值, h 是线性反褶积滤波因子, $\delta_r(1)$ 是 R 信号的第 1 个子样, A 是幅度拟合函数, b_x 是 X 信号拟合滤波因子, $\delta_x(1)$ 是 X 信号的第 1 个子样。这里 h , b_x , A 的确定复杂且带有人为因素。

综上所述, 到目前为止, 还没有能消除趋肤效应影响的准确测量不同深度处地层电导率(电阻率)的方法。

发明内容

本发明目的是提供一种不含趋肤效应影响的准确测量不同深度处地层电导率(电阻率)的无趋肤效应电磁波测井方法。

本发明目的是通过如下技术方案实现:

无趋肤效应电磁波测井方法对于任何线圈系组合的感应测井仪所取得的测井信号, 用 Lambert W 函数求解其电磁场传播系数, 进而提取地层电导率。

无趋肤效应电磁波测井方法线圈系包含 MAX_r 个发射线圈, MAX_s 个接收线圈, 分布的发射线圈发出电磁信号, 将接收线圈接收的电磁信号采用如下公式计算出地层视电导率 σ :

$$\sigma_{mn} = \frac{\text{Im}\left[W\left(\frac{V_{mn}\omega_m\mu L_{mn}^2 i}{2K_{mn}e}\right) + 1\right]^2}{\omega_m\mu L_{mn}^2}, \quad \varepsilon_{mn} = \frac{\text{Re}\left[W\left(\frac{V_{mn}\omega_m\mu L_{mn}^2 i}{2K_{mn}e}\right) + 1\right]^2}{\omega_m\mu L_{mn}^2}$$

式中: L_{mn} 是第 m 个发射线圈和第 n 个接收线圈之间的距离;

$$K_{mn} = \frac{\omega_m^2 \mu^2 \pi^2 a_{rn}^2 N_{rn} N_{rm} I_m}{4L_{mn}}$$
 为常规感应测井的仪器常数;

N_{rm} 和 N_{rn} 分别为第 m 个发射线圈和第 n 个接收线圈的匝数;

a_{rm} 和 a_{rn} 分别为第 m 个发射线圈和第 n 个接收线圈的半径;

第 m 个发射线圈的发射电流为 I_m , 角频率为 ω_m , 磁导率为 μ ;

第 m 个发射线圈在第 n 个接收线圈处的感应电动势为 V_{mn} ;

W 为 Lambert W 函数, Re 和 Im 分别表示取实部和虚部。

本发明主要特点是:

1. 所得地层电导率信号不存在趋肤效应影响, 测量结果准确, 在发射频率较高时, 可同时获得准确地层介电常数, 可以把实现这种方法的电子线路装入井下, 直接输出。
2. 提取地层电导率 (电阻率) 时无需作趋肤效应校正。
3. 在发射电流频率较高时, 可同时输出地层介电常数曲线。
4. 对发射线圈和接收线圈的位置可以不加限制。
5. 没有对地层真电导率的大小和发射电流频率作任何限制, 因而计算出的结果为地层电导率的准确值。

附图说明

本发明附图说明如下:

图 1 为本发明发射线圈和接收线圈的位置示意图;

图 2 为本发明效果对比图。

具体实施方式

以下结合附图说明实施例:

本发明所得地层视电导率为:

$$\sigma_{mn} = \frac{\text{Im}\left[W\left(\frac{V_{mn}\omega_m\mu L_{mn}^2 i}{2K_{mn}e}\right) + 1\right]^2}{\omega_m\mu L_{mn}^2}, \quad \epsilon_{mn} = \frac{\text{Re}\left[W\left(\frac{V_{mn}\omega_m\mu L_{mn}^2 i}{2K_{mn}e}\right) + 1\right]^2}{\omega_m\mu L_{mn}^2}$$

式中: W 为 Lambert W 函数, Re 和 Im 分别表示取实部和虚部, 仪器包含 MAX_r 个发射线圈, MAX_r 个接收线圈。发射线圈和接收线圈在仪器中的位置

可以不加限制。 L_{mn} 是第 m 个发射线圈和第 n 个接收线圈之间的距离； N_{tm} 和 N_{rn} 分别为第 m 个发射线圈和第 n 个接收线圈的匝数； a_{tm} 和 a_{rn} 分别为第 m 个发射线圈和第 n 个接收线圈的半径；第 m 个发射线圈的发射电流为 I_m ，角频率为 ω_m ，由电磁感应的原理可知，在均匀介质空间中，若其电导率为 σ ，磁导率为 μ ，当线圈缩成点状时，设第 m 个发射线圈在第 n 个接收线圈处的感应电动势为 V_{mn} 。

实施例 1：单发单收感应仪器提取地层电导率的方法

设发射电流频率为 200MHz，发射线圈和接收线圈的间距为 $L=0.8m$ 。下面是多层模型提取电导率的方法比较，其中： $L\&T$ 代表本发明所得电导率，MODEL 表示模型电导率，R 代表常规感应测井方法所得电导率，RX 代表相量感应测井方法所得电导率。可以看出，本发明所提方法所得电导率最接近地层模型。

实施例 2：多发多收感应仪器提取地层电导率的方法

采用多发多收感应线圈系组成，提取地层电导率的方法与实施例 1 类似，只是把多发多收线圈系分解为多个单发单收仪器，对所得信号进行组合，加权优化，得到具有合理纵向分辨率和探测深度的合成曲线。对多层理论模型来说，结果与上图相同。

实施例 3：单发多收感应仪器提取地层复电导率的方法

仪器由多个单发双收线圈系组成，同样引入 Lambert W 函数，与实施例 2 不同的是，这里利用双收线圈的幅度比和相位差来获得地层电导率和介电常数。再对所得信号进行组合，加权优化，得到具有合理纵向分辨率和探测深度的合成曲线。

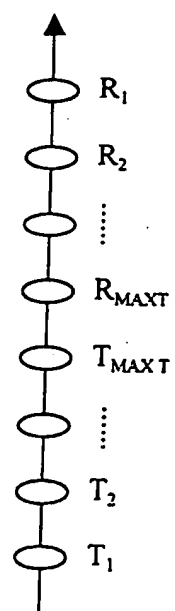


图 1

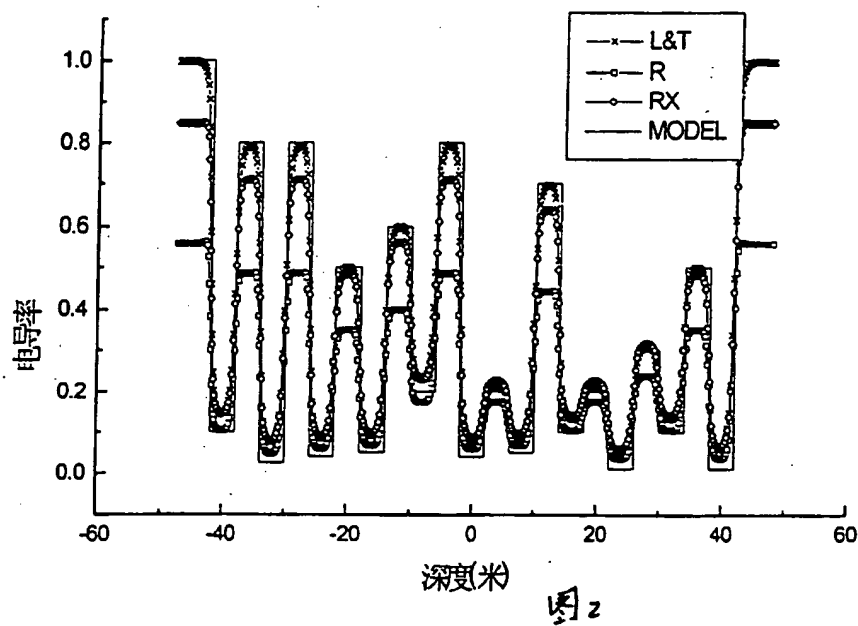


图 2